第40卷 第4期
2023年4月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 4
Apr. 2023

中亚五国水-能源-粮食-生态耦合关系及时空分异

吴玥葶[1,2]， 郭利丹[1,2,3]， 井沛然[4]， 黄 峰[2,3,5]， 王浩轩[5]

(1. 河海大学商学院，江苏 南京 211100；2. 河海大学国际河流研究中心，江苏 南京 211100；3. 江苏省“世界水谷”与水生态文明协同创新中心，江苏 南京 211100；4. 武汉大学水利水电学院，湖北 武汉 430072；5. 河海大学水文水资源学院，江苏 南京 210098)

摘 要：针对中亚复杂的跨界水问题，从地区和国家层面基于系统耦合视角开展水-能源-粮食-生态(WEFE)系统协调性研究。首先构建了WEFE耦合协调评价指标体系，然后运用耦合协调度模型对中亚地区WEFE协调发展水平及其时空演变特征进行定量评价。结果表明：(1) 近20 a中亚地区WEFE系统耦合度保持较高水平，耦合协调度呈现缓慢增长趋势但处于勉强协调；(2) 各国耦合协调发展水平差异较大，哈萨克斯坦耦合协调水平最优但处于初级协调，塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦为勉强协调，土库曼斯坦和乌兹别克斯坦为濒临失调；(3) 对比多系统的发展水平发现，塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦粮食存在明显滞后，土库曼斯坦属于水资源滞后型，哈萨克斯坦和乌兹别克斯坦属于能源滞后型，子系统间未能达到良好匹配，一定程度上影响地区协调发展。研究成果可为中亚地区的WEFE协同发展及国家间跨界河流开发合作提供决策依据。

关键词：水-能源-粮食-生态；中亚；耦合协调；时空演变

水资源、能源和粮食是关系人类生存和社会发展的重要战略资源，三者间存在密切且复杂的互馈关系。自“水-能源-粮食”(WEF)纽带概念被首次提出[1]以来，国内外学者主要从纽带关系内涵与关联机制[2-3]、理论框架[4-5]、区域纽带现状[6]等方面开展WEF研究；从研究方法上，主要包括投入产出法[7-8]、系统动力学模型[9-10]、耦合协调度模型[11]、地理加权回归模型[12]等。其中，耦合协调度模型常被用来研究多系统间的互馈关系，如徐辉等[13]利用该模型定量评价了黄河流域WEF系统协调发展水平；石天戈等[14]研究了中亚五国资源环境承载与经济发展间的耦合关系。生态系统作为水、能源、粮食等资源活动的重要载体，与WEF三者间存在相互依赖、相互影响的关系，生态系统与WEF间的匹配与耦合关系着区域发展和稳定，因此有必要将生态因素加入纽带关系之中[15]，如Shi等[16]基于贝叶斯网络对咸海流域水-能源-粮食-生态(WEFE)纽带进行了探讨。

中亚地区地处干旱内陆区，跨界水资源冲突尖锐、资源供需不匹配、资源过度开发、生态环境脆弱等问题尤为突出。以往针对中亚地区的研究主要集中在气候变化影响[17-18]、跨界水资源冲突[19-20]、水文环境[21-22]和生态评价[23]，以及水资源利用与经济社会发展、水土资源与农业发展的时空匹配度[24-25]等方面，有关WEFE系统协调性方面的研究较少。中亚地区多个国家叠加跨界流域，加上气候干旱、生态脆弱的特殊性，WEFE系统极为复杂，国家间水、能诉求与咸海生态危机治理需求强烈，亟需基于地区和国家层面的WEFE系统协调性视角进行系统治理和应对。

已有的WEF耦合协调发展文献主要集中于研究三者间的相互关系及耦合协调水平，较少关注生态与水-能源-粮食系统的耦合关系；从研究区域来看，多数研究是围绕国家或省级层面展开的，对跨国或跨地区分析较少，直接针对资源不匹配且发展缓慢的中亚地区的研究更为不足。尽管已有相关

收稿日期：2022-09-22； **修订日期：**2023-01-17
基金项目：新疆水专项(2020.E-002)；国家社会科学基金一般项目(19BGL181)；国家自然科学基金面上项目(71974053)；中央高校基本科研业务费专项资金项目(B210204025, B210207007)；湖南省水利厅科技项目(XSKJ2021000-03)
作者简介：吴玥葶(1998-)，女，硕士研究生，主要从事跨境河流管理、工程生态等研究. E-mail：wuyueting@hhu.edu.cn
通讯作者：郭利丹. E-mail：ldguohhu@163.com

研究分析了中亚五国资源与经济的耦合协调，但还不足以揭示中亚地区WEFE系统耦合水平。基于此，本文选择中亚五国作为典型研究对象，构建WEFE评价指标体系，运用耦合协调度模型从时空两个维度对子系统间的协调发展状况和演变特征进行量化分析，以期为促进中亚地区水-能源-粮食-生态协调发展、助力保护脆弱的生态环境、解决突出的资源利用矛盾提供参考。

1 研究区概况

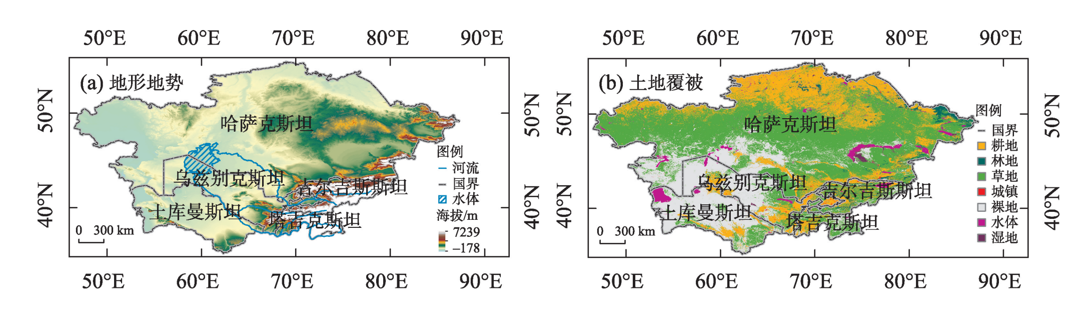
中亚地区位于亚欧大陆腹地、远离海洋，是典型的干旱半干旱气候区，主要包括塔吉克斯坦、吉尔吉斯斯坦、哈萨克斯坦、土库曼斯坦、乌兹别克斯坦5个国家，国土总面积达400多万平方公里。该地区地势起伏大，总体呈现东南高、西北低，土地利用类型多为耕地和草地[26]，东南部是天山山脉和帕米尔山区，是中亚地区的"水塔"；西部以平原盆地为主，多为沙漠或荒漠；中北部为低山丘陵区，为中亚主要的耕地区。中亚地区气候干燥、雨水稀少、蒸发大，降水时空分布不均，冬春季降水量多于夏秋季[27]，年均降水量低于300 mm且多集中于东南山区，平原区普遍较低[21]。咸海流域是中亚地区的重要跨界流域，主要依靠阿姆河、锡尔河径流补给，5个中亚国家部分或全部处于咸海流域，其中塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦位于河流上游山区，哈萨克斯坦、土库曼斯坦和乌兹别克斯坦位于河流下游[28]。中亚地区的地形地势和土地覆被情况见图1。

中亚地区的油气资源与风、光、水力等可再生能源资源丰富，但是水资源、土地资源及能源资源在各国间的分布十分不均。根据世界银行和联合国粮农组织统计，2019年中亚五国总人口7404×10^4人，GDP达3039×10^8现价美元；中亚五国的可更新水资源总量2275×10^8 m^3，粮食生产总量为2934×10^4 t，耕地和草地分别占土地面积的9.81%和71.2%，森林覆盖率为3.28%，其中下游三国石油和天然气储量分别为312×10^8桶和16.7×10^{12} m^3[29]。相对而言，无论是从国土面积还是从水资源和能源资源储量，哈萨克斯坦都是中亚五国中最为丰富的国家。由于干旱少雨的气候特征，中亚地区水资源短缺、生态环境脆弱；中亚五国的农业均以灌溉农业为主，并且受苏联时期不合理经济分工的影响，主要种植棉花、水稻等高耗水作物。过去半个世纪，在全球气候变化和人类活动影响下中亚地区整体表现为荒漠-绿洲过渡带以及天然植被的持续退化，加剧了中亚地区水系统的不稳定性和干旱威胁，进而导致水资源短缺及跨界河流争端等问题日趋突出[30]。总而言之，中亚地区是资源不匹配与季节性用水矛盾突出的敏感区域，由于社会发展需求，水资源与能源过度开发、不合理的粮食生产方式不断加剧中亚地区的生态环境恶化。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文选取研究时间范围为2000—2019年。水资源、粮食与土地利用数据来源于联合国粮农组织数据库（https://www.fao.org/faostat/en/#data）；人口、GDP数据来源于世界银行数据库（https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators）；能源及二氧化碳排放量数据来源于国际能源机构数据库（https://www.iea.org/data-and-statistics）；保护区数据来源于世界保护区数据库（https://www.protectedplanet.net/），本文只选取陆地上I~VI类保



注：底图采用自然资源部标准地图制作，审图号为GS(2020)4393号，对底图边界无修改。下同。

图1 中亚地区地形和土地覆被

Fig. 1 Topography and land cover of in Central Asia

护区。

2.2 评价指标体系

为反映中亚地区水资源、能源、粮食、生态之间的耦合协调水平，首先选取具有代表性指标、建立评价指标体系。基于中亚地区水、能源、粮食、生态发展现状，参考已有文献[31-33]，遵循客观性、系统性、合理性、数据可获得性等原则，构建WEFE评价指标体系，包含2个层级，23项指标（表1）。为使数据具有可比性，万元GDP用水量和万元GDP能耗以2015年不变价美元为标准进行计算。能源生产量是指一定时期内产生的煤、石油、天然气、水电、风能和光能的总和，能源消费量指一定时期内消费的煤、石油、天然气、电力、热能和生物质能的总和，根据IEA的统计范围与换算规则[34]，各种类别的能源产品都采用通用能量单位太焦（TJ）来计算其一次能源当量①。本文利用改进后的极差标准化法对指标进行标准化处理[13]，采用熵权法确定指标权重[35]。

2.3 耦合协调度模型

耦合度可反映子系统间相互作用、相互影响的强弱程度；耦合协调度可定量描述系统间协调发展水平[36]。本文通过构建耦合度及耦合协调度模型分别评价WEFE相互作用程度和协调发展情况。

（1）子系统发展水平评价指数

通过线性加权分别计算水资源 $f(x)$ 、能源 $g(y)$ 、粮食 $h(z)$ 、生态 $q(e)$ 子系统的发展水平评价指数，计算公式如下：

$$f(x)=\sum_{j=1}^{6} w_j x'_{ij} \qquad (1)$$

$$g(y)=\sum_{j=1}^{6} w_j y'_{ij} \qquad (2)$$

表1　中亚地区WEFE评价指标体系

Tab. 1　Evaluation index system of WEFE in Central Asia

子系统层		指标层	单位	性质	权重
水资源	水资源供给情况	人均可再生内陆水资源量	m^3·人$^{-1}$	正	0.245
		产水模数	m^3·hm^{-2}	正	0.346
	水资源消费情况	人均用水量	m^3·人$^{-1}$	负	0.068
	用水效益	万元GDP用水量	m^3·(10^4元)$^{-1}$	负	0.019
	用水结构	农业用水比例	%	负	0.269
		工业用水比例	%	负	0.053
能源	能源供给情况	人均能源生产量	TJ	正	0.255
	能源消费情况	人均能源消费量	TJ	负	0.069
	能源供给结构	煤炭产量比例	%	正	0.218
	能源消费结构	生活用电比例	%	正	0.127
		可再生能源消费比例	%	正	0.303
	能源利用效益	万元GDP能耗	TJ·(10^4元)$^{-1}$	负	0.028
粮食	粮食生产情况	人均粮食产量	t·人$^{-1}$	正	0.158
		粮食单产	kg·hm^{-2}	正	0.093
	粮食生产稳定性	粮食产量波动率	%	负	0.019
	粮食种植结构	粮食种植面积	hm^2	正	0.402
		人均耕地面积	hm^2·人$^{-1}$	正	0.295
	粮食需求	人口自然增长率	%	负	0.033
生态	生态环境水平	森林覆盖率	%	正	0.381
		保护区占陆地面积比例	%	正	0.190
	环境污染情况	工业废水排放量	t	负	0.078
		能源二氧化碳排放量	t	负	0.126
	对生态环境的压力	人口密度	人·km^{-2}	负	0.225

注：粮食产量波动率 $G_t=\left(Y_t-Y'_t\right)/Y'_t\times100\%$ ，Y'_t 为 t 时期的产量趋势值[37]。

① 在IEA数据库中，水电、风能和光能等统一选择电力作为一次能源形式，其单位为吉瓦时（GWh），与太焦之间的换算系数为3.6 TJ·$(GWh)^{-1}$。

$$h(z)=\sum_{j=1}^{6} w_j z'_{ij} \tag{3}$$

$$q(e)=\sum_{j=1}^{5} w_j e'_{ij} \tag{4}$$

式中：x'_{ij}、y'_{ij}、z'_{ij}、e'_{ij} 分别为4个子系统内各指标标准化后的数值；w_j 为各指标权重。

（2）耦合度及耦合协调度模型

$$C=\frac{4\times\sqrt[4]{f(x)\times g(y)\times h(z)\times q(e)}}{f(x)+g(y)+h(z)+q(e)} \tag{5}$$

$$D=\sqrt{C\times T} \tag{6}$$

$$T=\alpha f(x)+\beta g(y)+\gamma h(z)+\varphi q(e) \tag{7}$$

式中：C 为耦合度，$C\in[0,1]$，C 越大，表明系统耦合度越强，关联越紧密；反之，则越弱。D 为耦合协调度，$D\in[0,1]$，D 越大，表明系统协调状况越好；反之，则表明协调性差。T 为综合评价指数，代表系统的综合发展能力，T 越大，表明系统发展状况越好。其中 α、β、γ、φ 分别为水资源、能源、粮食、生态子系统的权重，本文认为4个子系统相互制约、具有同等重要性，令 $\alpha=\beta=\gamma=\varphi=1/4$。参考廖重斌[38]的研究成果，对耦合度及协调度进行划分（表2）。

表2 耦合度及协调度等级划分

Tab. 2 Coupling degree and coupling coordination degree classification

C	耦合等级	D	协调程度	协调类型
[0,0.3]	低水平耦合	[0,0.1)	失调衰退类	极度失调
(0.3,0.5]	拮抗阶段	[0.1，0.2)		严重失调
(0.5,0.8]	磨合阶段	[0.2，0.3)		中度失调
(0.8,1]	高水平耦合	[0.3，0.4)		轻度失调
		[0.4，0.5)	过渡类	濒临失调
		[0.5，0.6)		勉强协调
		[0.6，0.7)	协调发展类	初级协调
		[0.7，0.8)		中级协调
		[0.8，0.9)		良好协调
		[0.9,1]		优质协调

3 结果与分析

首先根据式(1)~式(7)计算出中亚五国2000—2019年WEFE系统的综合评价指数、耦合度及耦合协调度(表3)；将中亚五国视为一个整体，绘制中亚地区综合评价指数和耦合协调度的时序演变图(图2和图3)，从时空两个维度对中亚地区全域及各国之间纽带系统的系统评价指数和耦合协调发展进行分析；最后利用ArcGIS绘制出不同时期耦合协调度空间分布图(图4)。

3.1 WEFE系统综合水平分析

从时间演变来看，中亚地区整体综合评价指数呈缓慢上升趋势(图2)，从2000年的0.344上升至2019年的0.364。水资源、能源、生态子系统评价指数呈上升态势，而粮食子系统呈微弱下降态势，表明20 a来，水资源、能源、生态情况逐渐向好。水资源子系统在2019年上升至0.367，主要原因是中亚国家水资源利用效率提高，人均用水量和农业用水比例有所下降。能源子系统年际变化幅度最大，由2000年的0.263上升至2019年的0.335，主要因为能源开发利用水平提高，使得煤炭产量及人均能源产量增加。粮食子系统波动明显，2008—2013年波动幅度较大，在2008年、2010年、2012年指数出现下降，主要是受哈萨克斯坦粮食产量降低，以及2012年吉尔吉斯斯坦粮食产量下降的影响。生态子系统整体保持平稳上升，具有较高的评价指数，从2000年的0.518上升为2019年的0.535，说明中亚地区生态环境略向好，人们保护环境、保护咸海的意识和行动逐渐增强，森林覆盖率略有提高。

从空间维度来看，中亚五国综合评价指数均不高。哈萨克斯坦的综合评价指数最高，在2011年达到0.464，乌兹别克斯坦最低，在2000年仅有0.211。水土资源分布不均衡导致五国子系统评价指数有明显差异。塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦水资源评价指数较高，与其丰富的水资源量有关，两国人均可再生水资源量约7000~9000 m^3；土库曼斯坦水资源匮乏，存在用水结构不合理、农业用水占比大等因素，导致其水资源评价指数较低。能源评价指数较高的国家为塔吉克斯坦、吉尔吉斯斯坦和哈萨克斯坦，主要是由于这三国水能资源丰富，水力发电量大，使得可再生能源消费比例较高，从而对能源评价指数产生影响。粮食评价指数较高的下游国家是中亚主要的粮食种植基地，哈萨克斯坦和乌兹别克斯坦粮食产量大、种植面积广，土库曼斯坦人口数量相对较少、种植面积广等因素均使其粮食评价指数高。吉尔吉斯斯坦和土库曼斯坦生态子系统评价指数较高，主要归因于两国森林覆盖率和保护区占比高、工业废水和二氧化碳排放量较

表3　中亚五国WEFE综合评价指数、耦合度及耦合协调度均值

Tab. 3　Average value of comprehensive evaluation index, coupling degree and coupling coordination degree of WEFE in five Central Asian countries

国家	$f(x)$	$g(y)$	$h(z)$	$q(e)$	T	C	D	协调类型	制约因素
塔吉克斯坦	0.664	0.397	0.069	0.429	0.389	0.759	0.544	勉强协调	粮食滞后
吉尔吉斯斯坦	0.493	0.358	0.117	0.622	0.398	0.843	0.579	勉强协调	粮食滞后
哈萨克斯坦	0.389	0.330	0.674	0.394	0.447	0.961	0.655	初级协调	能源滞后
土库曼斯坦	0.077	0.238	0.124	0.712	0.287	0.689	0.445	濒临失调	水资源滞后
乌兹别克斯坦	0.171	0.116	0.147	0.494	0.232	0.834	0.440	濒临失调	能源滞后

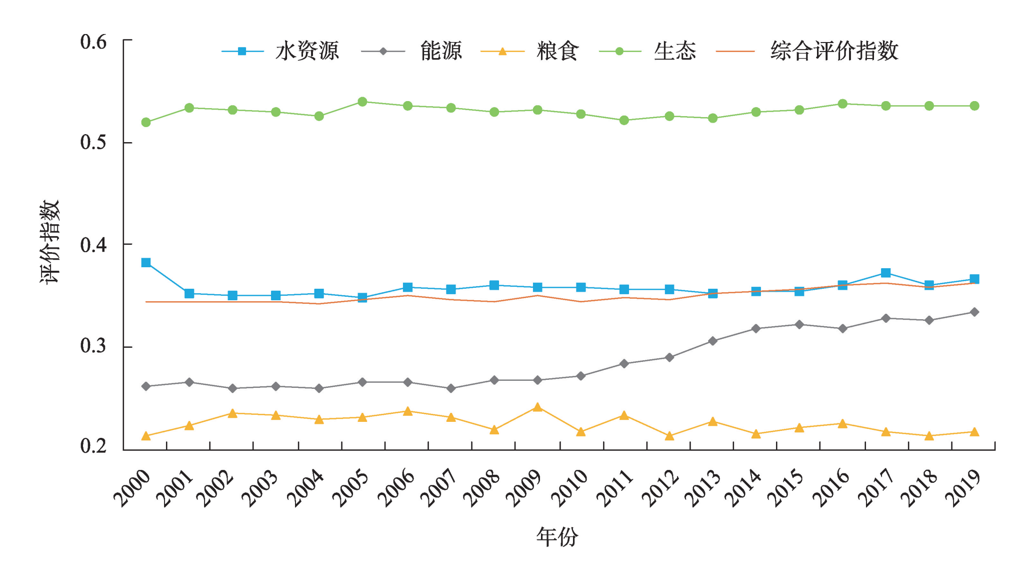


图2　2000—2019年中亚地区WEFE综合评价指数

Fig. 2　Comprehensive evaluation index of WEFE in Central Asia, 2000–2019

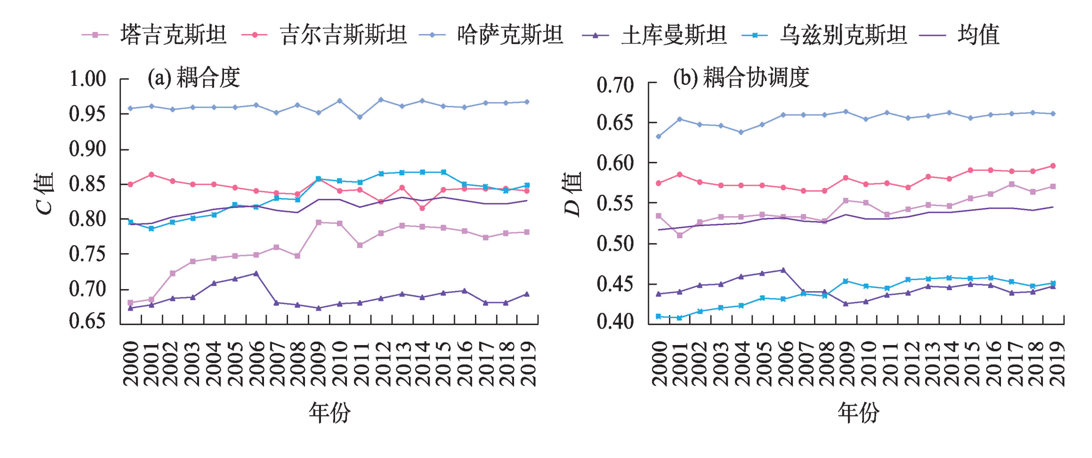


图3　2000—2019年中亚五国WEFE耦合度及耦合协调度

Fig. 3　Coupling degree and coupling coordination degree of WEFE in five Central Asian countries, 2000–2019

少。总体而言,上游国家各子系统发展水平及综合评价指数接近,这与相似的资源基础和地理环境有着很大的关系。

3.2　WEFE系统耦合协调度时空分析

总体上中亚五国耦合度、耦合协调度分别位于0.65~1、0.40~0.70区间,说明中亚五国水、能源、粮食、生态系统之间的相互作用较强、关联性强,但协调性和发展水平较差。

3.2.1　时间演变分析

(1) 耦合度(C)

2000—2019年中亚地区WEFE系统耦合度总体上呈波动上升态势(图3a),从2000年的0.791上

升至2019年的0.826，2009年上升较为明显。除2000年和2001年外，WEFE系统耦合度均处于高水平耦合阶段(均值为0.817)，说明中亚地区水、能源、粮食、生态四者相互作用性较强，具有稳定的关联性。中亚五国耦合度存在一定空间差异且逐年减小，标准差由2000年的0.107降为2019年的0.089。塔吉克斯坦耦合度在2000—2019年有明显上涨，从0.680上升至0.782，但始终处于磨合阶段，说明其子系统间的关系并不密切、相互作用较小；吉尔吉斯斯坦呈现小幅波动；哈萨克斯坦耦合度水平始终处于高位，大致在0.95~0.97区间浮动；土库曼斯坦整体呈现下降趋势；乌兹别克斯坦在2001—2009年间有大幅度增长，逐渐由磨合阶段转向高水平耦合阶段，说明其WEFE系统相互作用程度加强。

(2) 耦合协调度(*D*)

2000—2019年中亚地区WEFE系统耦合协调度呈缓慢增长趋势(图3b)，由2000年的0.518上升至2019年的0.545。从数值上看，系统耦合协调性较差，始终处于勉强协调状态(均值为0.532)，说明各类资源与生态系统间的协调性并不理想，各国综合评价指数较低是主要原因，根本原因为中亚地区水土能资源不合理开发利用、生态环境脆弱、受到人为因素干扰严重，导致子系统发展水平较差。

除土库曼斯坦出现轻微下滑趋势外，其余四国呈现不同程度上升趋势。乌兹别克斯坦波动幅度较大，波动范围在0.40~0.46之间。塔吉克斯坦、吉尔吉斯斯坦、哈萨克斯坦、土库曼斯坦和乌兹别克斯坦协调度均处于固定区间，分别为勉强协调、勉强协调、初级协调、濒临失调和濒临失调，说明五国的WEFE系统协调发展关系相对稳定。其中，土库曼斯坦耦合协调度较差，子系统发展不平衡、存在相互抑制关系，共经历了3个阶段：① 2000—2006年，耦合协调度保持增长趋势；② 2007—2009年，耦合协调度急剧下降；③ 2010—2019年，耦合协调度呈现缓慢上升。土库曼斯坦在2009—2010年协调水平下降的主要原因是，2009年俄罗斯和土库曼斯坦因天然气管道爆炸及气价矛盾导致天然气交易量降低[39]，造成了土库曼斯坦2009—2010年能源产量的降低。

3.2.2 空间差异分析 从子系统评价指数可以看出，中亚五国WEFE系统始终处于不平衡状态，制约耦合协调发展的主要因素有3种：① 塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦属于粮食滞后型，表明粮食子系统对系统的贡献较小；② 土库曼斯坦属于水资源滞后型；③ 哈萨克斯坦和乌兹别克斯坦属于能源滞后型，虽然两国化石能源丰富，但其可再生能源消费比例(指标体系中权重大)低，故能源子系统相对滞后。各国子系统间没有实现良好的协同发展，单一资源发展滞后将影响整体系统协调水平。

中亚五国协调度空间发展存在一定差异(图4)。整体上看，北部的哈萨克斯坦协调类型最优，子系统间发展水平差异较小，发展较为平衡。其他四国表现为由东至西递减分布，塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦协调等级较高，土库曼斯坦和乌兹别克斯

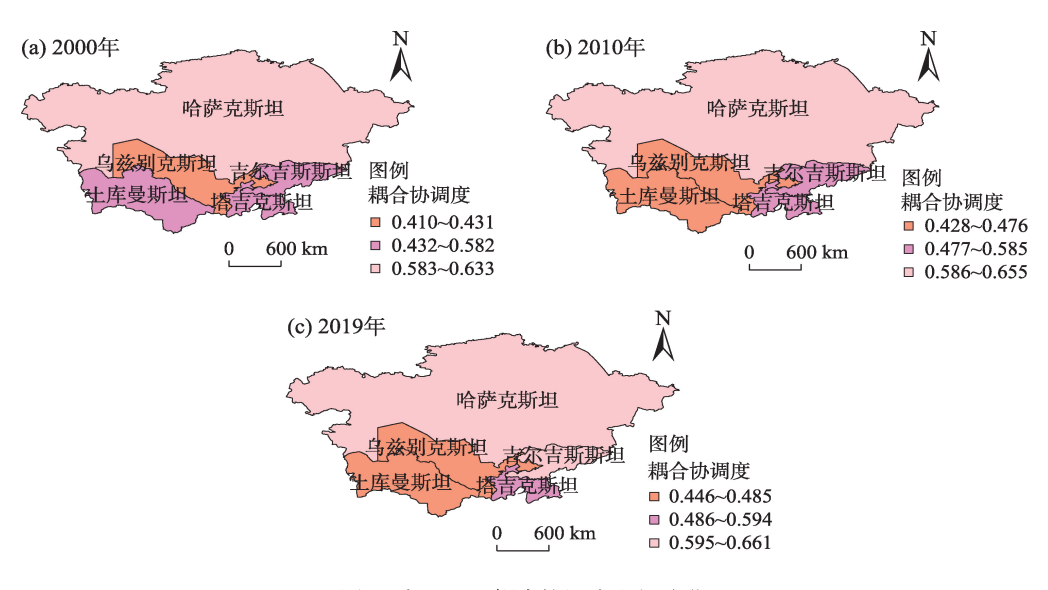


图4 中亚五国耦合协调度空间演化

Fig. 4 Spatial variation of WEFE coupling coordination degree in five Central Asian countries

坦协调等级较低且均未达到中亚地区耦合协调度平均水平。具体而言,2000年中亚地区协调度大致保持在0.41~0.64区间,均值为0.518,塔吉克斯坦、吉尔吉斯斯坦处于勉强协调,土库曼斯坦、乌兹别克斯坦处于濒临失调,仅哈萨克斯坦耦合协调度良好、处于初级协调。经过10 a演进,五国的耦合协调类型没有发生根本性变化,均值为0.531,但塔吉克斯坦、哈萨克斯坦和乌兹别克斯坦协调度有所提升。2019年中亚五国的耦合协调度均有所提升,大致保持在0.44~0.66区间,均值为0.545,系统的协调关系更加紧密,整体发展均衡性更好,但五国的协调类型仍没有变化。总体来看,中亚各国的WEFE系统均未实现良好协调。

4 讨 论

中亚地区深居欧亚大陆腹地,地理位置独特,气候干旱、生态环境脆弱,自然资源尤其是能源富集而水资源短缺,并且水、能源、土地等资源的空间分布极不均衡。比如,就咸海流域范围而言,塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦水资源丰富,哈萨克斯坦、土库曼斯坦和乌兹别克斯坦则矿藏和能源丰富。独特的自然地理条件和地缘环境,造成了独立后的中亚国家在社会经济复苏中面临着水资源-能源资源交织、水分配与水-能资源诉求各异等问题,水土资源的过度开发加剧了多样化的生态环境问题,进而导致整个中亚地区WEFE各子系统间矛盾突出,影响着区域的经济发展。因此,中亚各国社会经济发展的需求影响着地区及国家内部WEFE协调水平,同时各国的可持续发展也离不开中亚地区WEFE系统协调稳定的背景。从研究视角上,相比仅考虑资源环境与经济的二维视角[14],综合考虑水-能源-粮食-生态四维视角的系统研究能更为全面地揭示中亚地区社会经济可持续发展的多因素耦合协调水平;相比单纯从区域或跨界流域层面的研究[15-18],从国家层面研究中亚地区水-能源-粮食-生态各要素间的耦合关系,更有助于为国家间合作提供决策依据。

研究发现,中亚五国水资源、能源、粮食、生态4个子系统的综合评价指数与耦合协调水平均相对偏低且具有空间差异,主要是受到各国内部发展不均衡和地理环境条件的限制;五国均属于资源型国家,但优势资源类型及其开发利用程度不同,比如平原区广袤的土地更适合粮食、棉花等农作物生长,高山区丰富的水能资源则更适合水力发电,使得五国的水-能源-粮食(WEF)子系统发展水平及其与生态(E)子系统间的协调发展水平各异。水资源与油气资源均是中亚国家经济发展中的重要基础性和战略性资源,水资源的稀缺性制约了中亚地区灌溉农业和经济的发展,上下游用水的结构性矛盾又加剧了粮食安全和能源安全[2]。Huang等[40]针对哈萨克斯坦城市化与生态环境耦合协调度的研究结论,与本文从5个国家视角的中亚地区多系统耦合关系研究结论一致,说明本文从国家层面入手研究中亚地区纽带关系的耦合协调性既是可行的也是有价值的。本文提出的WEFE评价指标体系是基于科学性、代表性等原则并充分考虑研究区域水资源、能源、粮食与生态要素之间影响关系而构建的,限于数据可获得性可能存在个别指标遗漏,但通过本文研究结果与现有文献结果对比,该指标体系能够在一定程度上较为全面地反映WEFE系统各方面特征。今后,在数据不断更新丰富的基础上可进一步考虑细化指标体系并将研究视域细化至各国的州市等级别,以深化WEFE系统耦合协调机制的时空差异。

5 结论与建议

(1) 中亚地区水-能源-粮食-生态系统综合评价指数总体上呈现平稳上升趋势。水资源、能源、生态子系统与综合评价指数发展趋势一致,粮食子系统发展水平有所降低。中亚五国子系统发展水平空间分布与资源禀赋具有一致性,塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦由于具有相对丰富的水资源、水力发电量大,水资源及能源子系统发展水平较好,属于粮食滞后型;哈萨克斯坦、土库曼斯坦和乌兹别克斯坦粮食种植面积广,粮食子系统发展水平较好,哈萨克斯坦和乌兹别克斯坦属于能源滞后型,土库曼斯坦水资源匮乏,属于水资源滞后型。

(2) 中亚地区水-能源-粮食-生态系统耦合度较高但协调度较低,存在空间发展不平衡现象。中亚五国耦合度大多处于高水平耦合阶段,子系统间关联度较强,总体呈现上升态势。中亚地区耦合协调度总体呈现缓慢增长趋势,但仍处于勉强协调,

子系统发展存在相互制约关系。北部的哈萨克斯坦耦合度及协调度最高,为初级协调阶段;塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦始终为勉强协调阶段;土库曼斯坦和乌兹别克斯坦协调水平较差,属于濒临失调。

为实现区域可持续发展,加强系统间协调水平,基于中亚地区水-能源-粮食-生态耦合协调发展状况,提出如下建议:

(1) 协同发展。基于五国不同资源禀赋和发展现状,有针对性地制定发展战略,统筹兼顾,协同对待水、能源、粮食、生态的发展目标,特别是提升低协调地区(国家)的滞后子系统发展水平,推进资源可持续利用,提升协调水平,实现经济高质量发展和总体竞争力。

(2) 引进先进技术,加强综合管理,突破制约因素。提高水资源利用效率,优化水资源配置。优化能源结构、发展清洁能源,提升工业企业技术创新能力。发展节水灌溉技术,提高自然灾害预警能力和应急反应能力,加强耕地保护工作。加强地区生态保护建设、提升污染治理水平,提倡节能减排。

参考文献(References):

[1] Hoff H. Understanding the Nexus. Background Paper for the Bonn 2011 Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus[R]. Stockholm: Stockholm Environment Institute, 2011.

[2] 于宏源. 纽带安全: 能源-粮食-水安全威胁及其思考[J]. 区域与全球发展, 2018, 2(2): 94-110. [Yu Hongyuan. The energy-food-water security nexus security and its implications[J]. Area Studies and Global Development, 2018, 2(2): 94-110.]

[3] Zhang C, Chen X X, Li Y, et al. Water-energy-food nexus: Concepts, questions and methodologies[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 195: 625-639.

[4] 李良, 毕军, 周元春, 等. 基于粮食-能源-水关联关系的风险管控研究进展[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(7): 85-92. [Li Liang, Bi Jun, Zhou Yuanchun, et al. Research progress of regional environment risk management: From the perspectives of food-energy-water nexus[J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(7): 85-92.]

[5] Simpson G B, Jewitt G P W. The development of the water-energy-food nexus as a framework for achieving resource security: A review[J]. Frontiers in Environmental Science, 2019, 7: 8.

[6] 罗巍, 杨玄酯, 杨永芳, 等. 黄河流域水-能源-粮食纽带关系协同演化及预测[J]. 资源科学, 2022, 44(3): 608-619. [Luo Wei, Yang Xuanzhi, Yang Yongfang, et al. Co-evolution of water-energy-food-nexus in the Yellow River Basin and forecast of future development[J]. Resources Science, 2022, 44(3): 608-619.]

[7] Owen A, Scott K, Barrett J. Identifying critical supply chains and final products: An input-output approach to exploring the energy-water-food nexus[J]. Applied Energy, 2018, 210: 632-642.

[8] White D J, Hubacek K, Feng K, et al. The water-energy-food nexus in East Asia: A tele-connected value chain analysis using inter-regional input-output analysis[J]. Applied Energy, 2018, 210: 550-567.

[9] 孙才志, 周舟, 赵良仕. 基于SD模型的中国西南水-能源-粮食纽带系统仿真模拟[J]. 经济地理, 2021, 41(6): 20-29. [Sun Caizhi, Zhou Zhou, Zhao Liangshi. System simulation of water-energy-food in southwest China based on SD model[J]. Economic Geography, 2021, 41(6): 20-29.]

[10] Bakhshianlamouki E, Masia S, Karimi P, et al. A system dynamics model to quantify the impacts of restoration measures on the water-energy-food nexus in the Urmia lake Basin, Iran[J]. Science of the Total Environment, 2020, 708: 134874.

[11] Xu S S, He W J, Shen J Q, et al. Coupling and coordination degrees of the core water-energy-food nexus in China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16 (9): 1648.

[12] 白景锋, 张海军. 中国水-能源-粮食压力时空变动及驱动力分析[J]. 地理科学, 2018, 38(10): 1653-1660. [Bai Jingfeng, Zhang Haijun. Spatio-temporal variation and driving force of water-energy-food pressure in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(10): 1653-1660.]

[13] 徐辉, 王亿文, 张宗艳, 等. 黄河流域水-能源-粮食耦合机理及协调发展时空演变[J]. 资源科学, 2021, 43(12): 2526-2537. [Xu Hui, Wang Yiwen, Zhang Zongyan, et al. Coupling mechanism of water-energy-food and spatiotemporal evolution of coordinated development in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2021, 43(12): 2526-2537.]

[14] 石天戈, 时卉. 中亚五国资源环境承载与经济发展耦合协调性分析[J]. 世界地理研究, 2019, 28(6): 32-41. [Shi Tiange, Shi Hui. Coupling relationship between resources, environment carrying capacity and economy in five Central Asia countries[J]. World Regional Studies, 2019, 28(6): 32-41.]

[15] 王奕佳, 刘焱序, 宋爽, 等. 水-粮食-能源-生态系统关联研究进展[J]. 地球科学进展, 2021, 36(7): 684-693. [Wang Yijia, Liu Yanxu, Song Shuang, et al. Research progress of the water-food-energy-ecosystem nexus[J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(7): 684-693.]

[16] Shi H Y, Luo G P, Zheng H W, et al. A novel causal structure-based framework for comparing a basin-wide water-energy-food-ecology nexus applied to the data-limited Amu Darya and Syr Darya river basins[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2021, 25(2): 901-925.

[17] 高洁, 赵勇, 姚俊强, 等. 气候变化背景下中亚干旱区大气水分循环要素时空演变[J]. 干旱区研究, 2022, 39(5): 1371-1384. [Gao Jie, Zhao Yong, Yao Junqiang, et al. Spatiotemporal evolu-

tion of atmospheric water cycle factors in arid regions of Central Asia under climate change[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(5): 1371–1384.]

[18] Kuzmina Zh V, Treshkin S E. Climate changes in the Aral Sea region and Central Asia[J]. Arid Ecosystems, 2016, 6(4): 227–240.

[19] Lee S O, Jung Y. Efficiency of water use and its implications for a water-food nexus in the Aral Sea Basin[J]. Agricultural Water Management, 2018, 207: 80–90.

[20] Ziganshina D R, de Schutter J L G. Paving the way for evidence-driven transboundary water cooperation in Central Asia[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2022, 58(6): 1149–1161.

[21] 姚俊强, 杨青, 毛炜峄, 等. 气候变化和人类活动对中亚地区水文环境的影响评估[J]. 冰川冻土, 2016, 38(1): 222–230. [Yao Junqiang, Yang Qing, Mao Weiyi, et al. Evaluation of the impacts of climate change and human activities on the hydrological environment in Central Asia[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(1): 222–230.]

[22] 莫贵芬, 冯建中, 白林燕, 等. 2001—2018年中亚干旱区地表水资源时空变化特征[J]. 地理科学, 2022, 42(1): 174–184. [Mo Guifen, Feng Jianzhong, Bai Linyan, et al. Spatio-temporal dynamic characteristics of surface water resources in arid regions of Central Asia from 2001 to 2018[J]. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(1): 174–184.]

[23] Li J X, Chen Y N, Xu C C, et al. Evaluation and analysis of ecological security in arid areas of Central Asia based on the emergy ecological footprint (EEF) model[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 235: 664–677.

[24] 郝林钢, 左其亭, 刘建华, 等. "一带一路"中亚区水资源利用与经济社会发展匹配度分析[J]. 水资源保护, 2018, 34(4): 42–48. [Hao Lingang, Zuo Qiting, Liu Jianhua, et al. Analysis of matching degree between water resources utilization and economic-social development in Central Asia are of "Belt and Road"[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(4): 42–48.]

[25] 何理, 王喻宣, 尹方平, 等. 全球气候变化影响下中亚水土资源与农业发展多元匹配特征研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, 50(9): 1268–1279. [He Li, Wang Yuxuan, Yin Fangping, et al. The multivariate matching properties among water and soil resources and agricultural development in Central Asia under global climate change[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2020, 50(9): 1268–1279.]

[26] 彭宇, 李发东, 徐宁, 等. 1990—2019年中亚五国干旱状况时空变化特征及大气涛动驱动分析[J]. 中国生态农业学报, 2021, 29(2): 312–324. [Peng Yu, Li Fadong, Xu Ning, et al. Spatial-temporal variations in drought conditions and their climatic oscillations in Central Asia from 1990 to 2019[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(2): 312–324.]

[27] 胡汝骥, 姜逢清, 王亚俊, 等. 中亚(五国)干旱生态地理环境特征[J]. 干旱区研究, 2014, 31(1): 1–12. [Hu Ruji, Jiang Fengqing, Wang Yajun, et al. Arid ecological and geographical conditions in five countries of Central Asia[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(1): 1–12.]

[28] 郭利丹, 吴玥葶, 黄峰, 等. 上下游型跨界流域水资源重复博弈及策略——以咸海流域为例[J]. 水利经济, 2022, 40(6): 16–23. [Guo Lidan, Wu Yueting, Huang Feng, et al. Study on repeated game and strategy of transboundary basin water resources for the up-down type of international rivers: taking the Aral Sea Basin as an example[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2022, 40 (6): 16–23.]

[29] BP. Statistical Review of World Energy 2021[EB/OL]. https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf, 2022-07-10.

[30] 李稚, 李玉朋, 李鸿威, 等. 中亚地区干旱变化及其影响分析[J]. 地球科学进展, 2022, 37(1): 37–50. [Li Zhi, Li Yupeng, Li Hongwei, et al. Analysis of drought change and its impact in Central Asia[J]. Advances in Earth Science, 2022, 37(1): 37–50.]

[31] 邓鹏, 陈菁, 陈丹, 等. 区域水-能源-粮食耦合协调演化特征研究——以江苏省为例[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(6): 232–238. [Deng Peng, Chen Jing, Chen Dan, et al. The evolutionary characteristics analysis of the coupling and coordination among water, energy and food: Take Jiangsu province as an example[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(6): 232–238.]

[32] 孙才志, 阎晓东. 中国水资源-能源-粮食耦合系统安全评价及空间关联分析[J]. 水资源保护, 2018, 34(5): 1–8. [Sun Caizhi, Yan Xiaodong. Security evaluation and spatial correlation pattern analysis of water resources-energy-food nexus coupling system in China[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(5): 1–8.]

[33] 李成宇, 张士强. 中国省际水-能源-粮食耦合协调度及影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(1): 120–128. [Li Chengyu, Zhang Shiqiang. Chinese provincial water-energy-food coupling coordination degree and influencing factors research[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(1): 120–128.]

[34] International Energy Agency (IEA). Database documentation (Renewables information 2022 edition) [EB/OL]. http://wds.iea.org/wds/pdf/ren_documentation.pdf, 2022-12-20.

[35] Cui D, Chen X, Xue Y L, et al. An integrated approach to investigate the relationship of coupling coordination between social economy and water environment on urban scale: A case study of Kunming[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 234: 189–199.

[36] 周成, 冯学钢, 唐睿. 区域经济—生态环境—旅游产业耦合协调发展分析与预测——以长江经济带沿线各省市为例[J]. 经济地理, 2016, 36(3): 186–193. [Zhou Cheng, Feng Xuegang, Tang Rui. Ecological environment-tourism industry: A case study of provinces along the Yangtze economic zone[J]. Economic Geography, 2016, 36(3): 186–193.]

[37] 李福夺, 杨兴洪. 新疆粮食生产波动: 波动特征与影响因素[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(8): 54−61. [Li Fuduo, Yang Xinghong. The food production fluctuation in Xinjiang: Fluctuation characteristics, influence factors and policy recommendations[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(8): 54−61.]

[38] 廖重斌. 环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系——以珠江三角洲城市群为例[J]. 热带地理, 1999, 19(2): 171−177. [Liao Chongbin. Quantitative judgement and classification system for coordinated development of environment and economy: A case study of the city group in the Pearl River Delta[J]. Tropical Geography, 1999, 19(2): 171−177.]

[39] Overland I. Natural gas and Russia-Turkmenistan relations[J]. Russian Analytical Digest, 2009, 56(9): 9−13.

[40] Huang J C, Na Y, Guo Y. Spatiotemporal characteristics and driving mechanism of the coupling coordination degree of urbanization and ecological environment in Kazakhstan[J]. Journal of Geographical Sciences, 2020, 30(11): 1802−1824.

Coupling relationship and spatiotemporal differentiation of the water-energy-food-ecology nexus in five Central Asian countries

WU Yueting[1,2], GUO Lidan[1,2,3], JING Peiran[4], HUANG Feng[2,3,5], WANG Haoxuan[5]

(1. Business School, Hohai University, Nanjing 211100, Jiangsu, China; 2. International River Research Centre, Hohai University, Nanjing 211100, Jiangsu, China; 3. Jiangsu Provincial Collaborative Innovation Center of World Water Valley and Water Ecological Civilization, Nanjing 211100, Jiangsu, China; 4. School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China; 5. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China)

Abstract: To shed light on the complex transboundary water problems in Central Asia, a study on water-energy-food- ecology (WEFE) system coordination was conducted from the regional and national levels based on a system coupling perspective. First, the WEFE evaluation index system for coupling and coordination was constructed, and then the coupling coordination degree model was applied to quantitatively evaluate the level of coordinated development of WEFE and its spatial and temporal evolution in Central Asia. The results show that: (1) In the last 20 years, the coupling degree of WEFE in Central Asia basically maintained a high level, and the coupling coordination degree showed a slow growth trend but was barely coordination. (2) The development level of coupling coordination varied greatly among countries, and the coupling coordination level of Kazakhstan was the best, albeit in primary coordination. Tajikistan and Kyrgyzstan barely performed coordination, and Turkmenistan and Uzbekistan were on the brink of misalignment. (3) Comparing the development levels of multiple systems, it was found that there was a significant lag in the food system in Tajikistan and Kyrgyzstan, a lag in the water system in Turkmenistan, and a lag in the energy system in Kazakhstan and Uzbekistan, which failed to achieve a good match among systems and affected the regional coordinated development to a certain extent. The results can provide a basis for decision-making on the synergistic development of WEFE in Central Asia and transboundary river development cooperation among countries.

Keywords: water-energy-food-ecology; Central Asia; coupling relationship; spatial-temporal evolution